5Г

УДК 629.052.7, 004.946

В.В. Ганченко, А.А. Дудкин, А.В. Инютин, Л.П. Поденок
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
{ganchenko, avin, podenok}@lsi.bas-net.by, doudkin@newman.bas-net.by

Моделирование оптико-электронной системы беспилотных летательных аппаратов

В статье рассматривается проблема моделирования работы оптико-электронной системы БПЛА для задачи отладки алгоритмов поиска и идентификации навигационных ориентиров. Предлагается использовать виртуальный полигон, формируемый на основе данных, взятых из открытых источников (Google Earth, SRTM) для моделирования видеопотока данных, получаемых с камеры БПЛА. Использование при разработке библиотеки OpenGL значительно упростило решение задач визуализации сцен, а также процесс моделирования погодных условий и условий освещения.

Введение

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет быстро получать данные, необходимые для принятия оперативных решений. Однако отладка системы управления аппаратом может быть затруднена или невозможна по ряду причин. Для отладки системы управления БПЛА можно использовать виртуальный полигон (ВП). Под термином «виртуальный полигон» будем понимать набор программных средств (ПС), моделирующих работу оптико-электронной системы БПЛА. Компонентами ВП (рис. 1) являются ПС моделирования цифровой модели местности (ЦММ), моделирования метеоусловий и условий освещения, моделирования работы оптической системы БПЛА (камеры и объектива). ВП позволяет протестировать работу алгоритмов поиска и идентификации навигационных ориентиров для решения задачи уточнения положения БПЛА на местности. Широкое распространение в мире подобных систем говорит о высокой актуальности разработок в этой проблемной области, например, TerrainView – программное обеспечение визуализации трехмерных ландшафтов на основе виртуальной реальности [1].

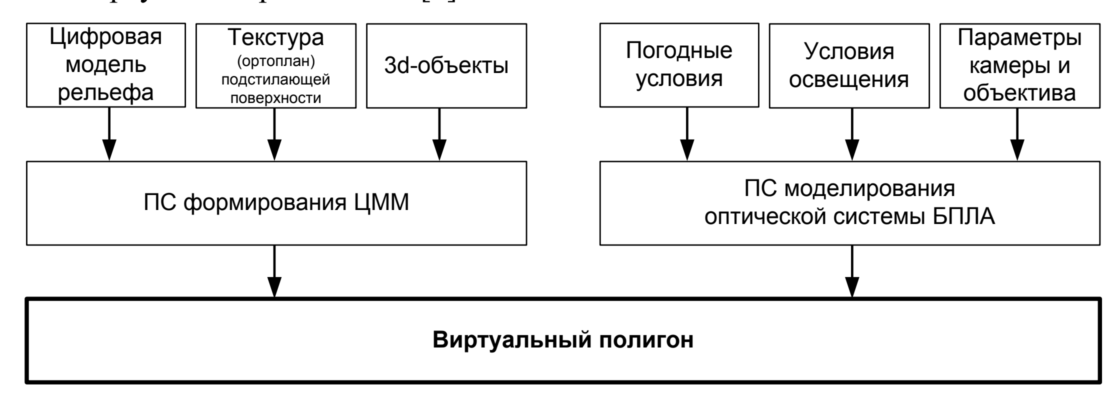


Рисунок 1 – Формирование виртуального полигона

В настоящей работе рассматривается исключительно маршевый участок полета, который характеризуется автономным режимом работы навигационного оборудования, функционирующего, как правило, в пассивном режиме дистанционного зондирования.

При этом использование бортовых инерциальных навигационных средств дает погрешность в виде бокового смещения, которое может достигать нескольких метров на километр трассы [2], [3]. Неоднородность метеообстановки на трассе полета влияет на точность определения высоты и может вносить погрешность, достигающую нескольких метров [4].

В связи с этим на маршруте выделяются участки, где выполняется коррекция движения – зоны коррекции. В зонах коррекции навигационное оборудование БПЛА на основе бортовых навигационных измерений выполняет две основные штурманские задачи: определение местоположения и курса следования. На основании полученных данных вносятся поправки в параметры маршрута движения, обеспечивающие выход в следующую зону коррекции.

Основными целями разработки ВП являются:

1) выбор и оценка наблюдаемости навигационных ориентиров вдоль маршевого коридора;

2) разработка и оценка алгоритмов поиска, идентификации навигационных ориентиров (НО), сопровождения НО в видеопотоке. Данные алгоритмы являются основой для решения штурманских задач на маршевом участке.

Выполнение указанных выше целей достигается решением следующих **задач**: формирование ВП на основе изображений, полученных средствами аэрокосмической съемки, а также данных о рельефе и объектах на местности; выбор и формирование набора НО вдоль маршевого коридора; моделирование потока кадров с бортовых видеокамер (видеопотока) с учетом положения, направления, скорости движения БПЛА и положения камеры.

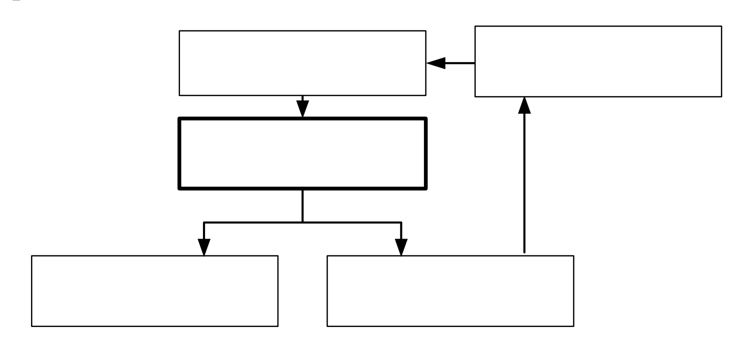


Рисунок 2 – Задачи, решаемые с помощью ВП

Основной задачей ВП является моделирование изображений местности, наблюдаемых с борта на маршевом участке траектории. Оператор, формирующий маршевый коридор, использует виртуальный полигон совместно с имеющимися топографическими материалами для прокладки маршрута и оценки наблюдаемости окружающей местности, в том числе и НО, с учетом возможных отклонений как по курсу, так и по высоте.

Маршевый коридор формируется таким образом, чтобы в зонах коррекции система управления БПЛА могла надежно решить две основные штурманские задачи – определить свои местоположение и курс на основе анализа изображений, поступающих от компонент ОЭСН, и скорректировать состояние ИНС. Для этой цели на местности выделяются НО.

Под НО обычно понимается естественный или искусственный объект, выделяющийся на общем ландшафте местности (населенный пункт, река, дорога, мыс, гора, заводская труба и т.д.), с известными координатами или положением, который может быть использован для определения местонахождения БПЛА по визуальным наблюдениям. Местность считается опознанной, если борт распознает наблюдаемые на ней ориентиры, вид которых совпадает с их изображением из бортовой базы данных.

ПС формирования
маршрута

Одной из задач виртуального полигона является оценка качества и отбраковка НО, которые используются для поиска зоны коррекции маршрута, а также для решения штурманских задач. Выбор НО может производиться любыми методами, например, с использованием топографического материала или данных аэрокосмической съемки. Затем выбранный кандидат в НО должен быть протестирован на видимость и стабильность в зависимости от назначения НО. Оператор ВП может варьировать местоположение точки визирования, а также направление оптической оси камеры. Тем самым он может оценить видимость выбранного НО при вхождении в зону коррекции с учетом возможных отклонений входа в зону, а также оценить навигационные возможности кандидата в НО. Данная работа может быть выполнена заранее, а ее результаты могут использоваться по мере необходимости.

1 Требования к данным о местности

Актуальную и достоверную информацию о местности можно получить с помощью средств аэрокосмического наблюдения. Это, в частности:

– космические панхроматические и мультиспектральные снимки высокого пространственного разрешения;

– данные радиолокационного зондирования, в том числе данные радаров с синтезированной апертурой;

– аэрофотоснимки.

1.1 Требования к аэрокосмическим снимкам

Космические снимки на данную территорию могут быть получены в различное время года, что позволяет в процессе выполнения навигационных измерений учесть сезонные изменения в зонах коррекции.

Оценим требования к требуемому разрешению аэрокосмических снимков, подходящих для формирования виртуального полигона. Будем считать, что БПЛА имеет две камеры с углом зрения 60°, наклоненные под углом в 30° к вертикали. Таким образом, ширина подтрассового изображения, полученная с двух камер, будет составлять при этом ~2*1,73H, где H – высота полета. При H = 100 м ширина подтрассового изображения составит около 350 м.

Камера с разрешением 1024х×1024 пикселей и объективом с полным углом 60° имеет разрешение ~0,001 рад/пел. При наклоне оси визирования в 30° изображение плоской поверхности будет иметь разрешение от 0,1 м/пел (надир) до 0,2 м/пел (край обзора).

Для того, чтобы обеспечить вышеуказанное разрешение при моделировании видеопотока от бортовой камеры с приведенными выше параметрами, необходимо иметь космоснимки с разрешением не менее, чем в два раза лучше, т.е. 0,05 м/пел.

С учетом того, что маршрут БПЛА в силу различных причин пролегает в стороне от запланированного, основным источником информации, используя которую выполняется ориентирование и коррекция траектории, является периферийная область обзора камеры. Это позволяет снизить требования к разрешению приблизительно в два раза. С учетом того, что ориентирование и коррекция траектории должны выполняться, в том числе и с учетом возможных атмосферных искажений, обусловленных осадками и туманом, требования к разрешению снимков для формирования виртуального полигона могут быть снижены на порядок в зависимости от климатических условий. Таким образом, разрешение космоснимков в 0,5 – 1 м/пел можно считать достаточным для моделирования изображений, с которыми имеет дело система коррекции полетной траектории.

Снимки, выполненные в надир и с наклоном менее 30° от вертикали для целей тестирования алгоритмов и проведения испытаний ВП, могут быть получены из Google.

Пример с разрешением порядка 0,25 м: (lat = 36,9574366 & lon = –76,3296604). Пример с разрешением порядка 1 м (lat = 32,8098748 & lon = 35,0425887).

Виртуальный полигон для отладки алгоритмов коррекции полетной траектории должен формироваться на территорию размером не менее 10 км диаметром, которую БПЛА пересечет за время около 50 с при скорости около 200 м/с. Общий размер изображений с разрешением не хуже 0,5 м на такой полигон будет составлять 300 – 400 Мпкс.

Для создания полигона из снимков разрешением 0,25 м потребуется 1,6 Гпкс или около 5 Гбайт (панхроматические снимки). Если навигация осуществляется по НО, расположенным вне транспортного коридора, размеры полигона должны быть соответственно увеличены. В этой связи следует отметить, что разрешение «внешней» части полигона может быть существенно понижено.

1.2 Требования к данным о рельефе

Для формирования виртуального полигона необходима информация о рельефе местности. Такая информация может быть получена с помощью орбитальных радиолокационных измерений. Для построения виртуального полигона достаточно данных, находящихся в открытом доступе, таких как данные миссии SRTM. Эти данные представляют собой набор высот в узлах прямоугольной сетки географических координат. В зависимости от конкретной территории доступны данные с пространственным разрешением от 30 до 90 м. Дискретизация по высоте составляет 1 м. Реальная погрешность по высоте неизвестна, поскольку полученные данные скорректированы исходя из характера местности. В частности, для водоемов, имеющих размеры порядка нескольких сот метров и более высоты уравнены. Поскольку данные SRTM достаточно грубы для реальной работы с полигоном, требуется их аппроксимация.

Для целей отладки алгоритмов реальный рельеф ВП не требуется – достаточно, чтобы рельеф не входил в критическое противоречие со снимками (река течет по холмам). Снимки и данные о рельефе должны быть совмещены с необходимой точностью.

2 Технические характеристики ВП

2.1 Хранение данных о местности

Для организации хранения и доступа к данным полигона необходима разработка базы данных и прикладного интерфейса доступа к требуемой части данных полигона. База данных нужна для быстрого доступа к снимкам полигона, а также к другой информации, которая может понадобиться в процессе визуализации местности. Информация, полученная из БД, используется для формирования сцены, которая впоследствии рендерится OpenGL для определенных условий наблюдения. К такой информации относятся: параметры аппроксимации рельефа с требуемой точностью на основе цифровой модели рельефа (DEM) по данным SRTM (30 м), данные об объектах, представляющих интерес с точки зрения ориентиров и целеуказания. Фактически, эта база представляет собой цифровую модель местности.

Цифровая модель местности (ЦММ) в первом приближении состоит из цифровой модели рельефа (ЦМР, цифровая карта высот – DEM), текстуры покрытия и объектов. Цифровая модель рельефа – ЦМР, или цифровая карта высот – DEM (Digital Elevation Map), представляет собой поверхность, заданную тем или иным образом. Может быть представлена в виде набора высот на регулярной сетке (матрица высот), набора высот на нерегулярной сетке (высоты в узлах триангуляции), кривых равных высот (горизонтали).

ЦМР может задаваться на сетке географических координат (широта, долгота) или в проекции. В частности, данные SRTM заданы на сетке географических координат. Матрица высот и набор, и высоты в узлах триангуляции практически не требуют обработки перед применением их для моделирования местности. ЦМР на основе горизонталей требует конвертации в матрицу или триангуляцию.

Текстура покрытия строится на основании мозаики снимков, выполненных в надир или ортотрансформированных. Базовое изображение текстуры покрытия (базовое покрытие) представляет собой нормальную проекцию реального покрытия на эллипсоид. Базовое покрытие формируется из мозаики. На основе ЦМР и наложенного базового покрытия строится визуализация модели местности уровня 2d5 – покрытый «плоский» рельеф, на котором нет объектов, имеющих высоту.

2.2 Совмещение рельефа и снимков

Для этой цели можно использовать практически любую ГИС, умеющую работать с DEM и растровыми объектами. К таким ГИС можно отнести ГИС GRASS, которая обеспечивает импорт растровых данных и данных SRTM, а также их проектирование.

Исходные SRTM данные находятся в системе географических координат (широта, долгота). Для аппроксимации исходных SRTM данных могут быть использованы любые методы, например, бикубические сплайны, поскольку исходная сетка регулярна. Однако после трансформации SRTM в проекцию покрытия сетка теряет регулярность и для практической аппроксимации требуется использовать, например, RBF-базис.

При размере полигона в 10×10 км сетка будет иметь порядка 105 узлов, что затрудняет прямое использование RBF методов. Проблема решается построением адаптивной к локальной кривизне триангуляции и использованию финитного базиса.

2.3 Рендеринг сцены

Визуализация окружающей изделие сцены, как ее «видит» аппаратура ОЭСН, выполняется с помощью библиотеки OpenGL [5]. В связи с тем, что 2d5-объекты на местности могут быть искажены до неузнаваемости, база данных полигона помимо текстурного покрытия, полученного с помощью проектирования панхроматических или мультиспектральных снимков, должна поддерживать поверх цифровой модели рельефа (ЦМР) модели фиксированных объектов, имеющие высоту и вертикальную структуру, таких, как строения, мосты. Эта возможность также может быть использована для моделирования района цели.

Объекты, имеющие высоты, вертикальную структуру и покрытие, формируют объектный слой визуализации (модель уровня 3d). Их рендеринг выполняется с помощью OpenGL.

2.4 Учет метеоусловий, времени суток и времени года

Большая часть метеоусловий и освещение выполняется с помощью библиотеки OpenGL. В процессе работы ВП могут быть внесены различного рода искажения в полученные изображения, включая геометрические, поканальные яркостные, изменена контрастность. Геометрические искажения полностью определяются характеристиками съемочной аппаратуры (в большей степени объективом) и носят осесимметричный характер. Объектив вносит также искажения, обусловленные неидеальностью оптической системы, что проявляется в неоднородном размытии изображения по полю зрения. Искажения, вызванные условиями наблюдения, в общем случае неоднородны по полю зрения. В табл. 1 показаны типичные потери в зависимости от погодных условий в ближнем инфракрасном диапазоне 850 нм [6], [7].

Таблица 1 – Типичные факторы затухания рассеивания при различных погодных условиях

Погодные условия	Затухание (дБ/км)
Ясная погода	0-3
Слабый дождь	3-6
Сильный дождь	6-17
Снег	6-26
Легкий туман	20-30
Густой туман	50-100
Облачность	300-400

Искажения перспективы, которые могут быть вызваны применением широко- и сверхширокоугольной оптики, в камере моделируются с помощью кривых Безье. Кадр из видеопоследовательности подается на вход функции, моделирующей искривление поверхности по эллипсу.

Импульсные и точечные помехи также моделируются на кадрах из видеоряда прохождения виртуального полигона привнесением на них случайных помех в виде черных дефектов по равномерному или неравномерному закону распределения вероятности случайной величины.

2.5 Прикладной уровень, взаимодействие с оператором

Приложения виртуального полигона обеспечивают формирование маршевого коридора в рамках полетного задания, выбор и формирование набора навигационных ориентиров вдоль маршевого коридора.

Приложения позволяют интерактивно обозревать полигон в необходимом разрешении, получать данные о покрытии и высотах из базы, выбирать маршевый коридор и навигационные ориентиры для определения положения БПЛА.

Поддерживаются режимы визуализации 2d5 и ортоплан с возможностью визуализации без текстурного покрытия (только рельеф) и с покрытием.

Программа визуализации сцены со стороны бортовых камер обеспечивает:

– манипулирование системами координат, связанными со сценой (модельная СК), БПЛА и камерой (камера может быть закреплена на турели);
– прямое управление координатами положения камеры и ее ориентацией в системе координат сцены;
– построение (задание параметров) некоторой кривой, которая может представлять собой траекторию движения или другим образом связывать степени свободы перемещения объекта;
– выбор осей системы координат, связанной с некоторой траекторией;
– перемещение камеры вдоль траектории;
– перемещение камеры в нормальной к траектории плоскости;
– связывание вращательных степеней свободы объекта;
– связывания вращательных степеней свободы камеры;
– управление апертурными характеристиками камеры;
– управление искажениями оптики камеры;
– протоколирование (log) манипуляций с объектами;
– запуск внешних программ с передачей им координатных данных и результатов рендеринга.

3 Состав и функции программных средств

Для адекватного функционирования программных средств имитационного моделирования работы оптико-электронной системы навигации (ОЭСН) при движении БПЛА по маршруту, с одной стороны, необходимы входные данные, с определенной степенью реальности отражающие окружающую обстановку, наблюдаемую с борта, а с другой – физически непротиворечивые данные о характере движения БПЛА на маршевом участке траектории. Таким образом, совместно с ПС имитационного моделирования работы ОЭНС были разработаны ПС моделирования окружающей обстановки (сцены) и динамики движения изделия. Эти ПС в контексте поставленной задачи имитационного моделирования работы ОЭСН образуют комплекс программных средств ВП. В состав ВП входят:

1) подсистема моделирования окружающей обстановки (АРЕНА);
2) подсистема моделирования работы ОЭНС (ВИЗУАЛИЗАТОР).

3.1 Подсистема моделирования окружающей обстановки

Подсистема моделирования окружающей обстановки состоит из:

- ПС базы данных (БД АРЕНА);
- ПС редактора сцены;
- ПС подготовки геоданных (ГИС АРЕНА);
- ПС подготовки 3d-элементов сцены (КОНСТРУКТОР).

Назначение и функции БД АРЕНА:

- хранение и обеспечение доступа к информации о районах пролегания возможных маршрутов (РПВМ) доставки изделия в контексте задач ВП;
- хранение и обеспечение доступа к данным о рельефе местности на территорию РПВМ;
- хранение и обеспечение доступа к данным аэрокосмической съемки на территорию РПВМ;
- хранение и обеспечение доступа к данным моделей 3d-элементов сцены РПВМ.

Назначение и функции ПС редактора сцены:

- сборка сцены из компонент, хранящихся в БД АРЕНА, для отображения программными средствами ВИЗУАЛИЗАТОР;
- представление собранной сцены в формате ВИЗУАЛИЗАТОРа.

Назначение и функции ГИС АРЕНА:

- стандартные для ГИС функции импорта геоданных, их обработки и визуализации, формирование карт и схем.

Назначение и функции ПС КОНСТРУКТОР:

- формирование иерархии параметризованных 3d-моделей объектов ВП, имеющих высоту, вертикальную структуру и боковую текстуру покрытия;
- манипулирование 3d-объектами (сборка/разборка, масштабирование растровой компоненты, присвоение атрибутов в контексте функций отображения подсистемой ВИЗУАЛИЗАТОР).

3.2 Подсистема моделирования работы ОЭНС

Подсистема моделирования работы ОЭНС состоит из:

- ПС управления условиями наблюдения;
- ПС управления ориентацией камеры;
- ПС управления свойствами камеры;

– ПС рендеринга кадра камеры из описания сцены;

– ПС формирования видеопотока.

Функции ПС управления условиями наблюдения:

– установка освещения (расположение источника и его свойства);

– установка параметров видимости (оптические свойства среды, характер распространения света).

Функции ПС управления ориентацией камеры:

– установка углов визирования.

Функции ПС управления свойствами камеры:

– установка апертуры, фокусного расстояния;

– установка искажений для объектива;

– установка спектральных характеристик.

Функции ПС рендеринга кадра камеры из описания сцены:

– рендеринг кадра камеры из описания сцены.

Функции ПС формирования видеопотока:

– формирование видеопотока из кадров (обработка и упаковка результатов рендеринга согласно выбранному стандарту).

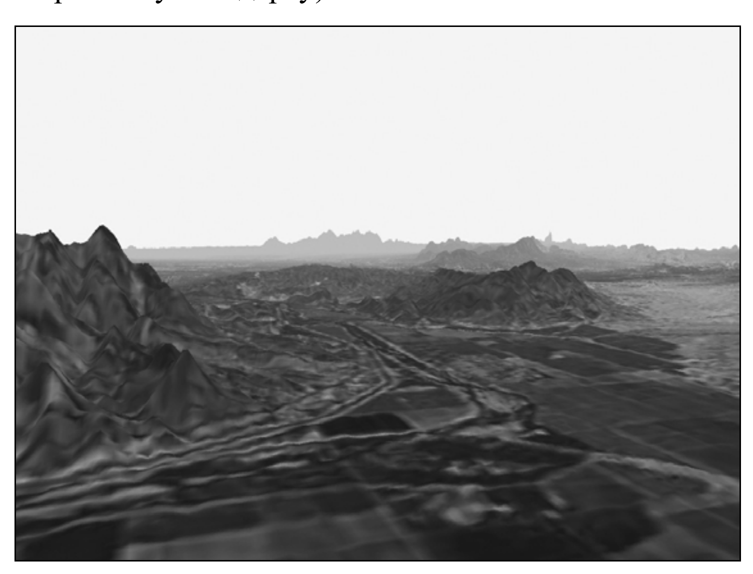


Рисунок 3 – Пример работы ВП

На рис. 3 приведен пример видеокадра, который формируется ВП на основе данных, взятых из открытых источников: ортоплан подстилающей поверхности взят из Google Earth для участка местности, расположенного между 32° и 33° северной широты и 114° и 115° западной долготы (Северная Америка). Данные о рельефе получены из архива SRTM с разрешением 30 м, дискретизация по высоте составляет 1 м [8]. Использованы следующие параметры для моделирования: БПЛА находится на высоте 400 м, камера имеет апертурный угол 45° и наклонена на 5° вниз относительно линии горизонта, погодные условия – ясно, легкая дымка.

Выводы

В ходе работ по разработке ВП были созданы программные средства моделирования работы оптико-электронной системы БПЛА, позволяющих протестировать работу алгоритмов поиска и идентификации навигационных ориентиров, для решения

задачи уточнения положения БПЛА на местности. Использование библиотеки OpenGL значительно упростило решение задач визуализации сцен, а также процесс моделирования погодных условий и условий освещения.

Литература

1. TerrainView-Globe [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.viewtec.net/uploads/docs/terrainview_e.pdf – 14.05.2010.
2. Menon P.K. Computer-Aided Design Tools for Integrated Flight / Propulsion Control System Synthesis / P.K. Menon, V.R. Iragavarapu // Final Report Prepared under NASA Lewis Research Center Contract. – 1995. – NAS3-27578, June.
3. Avionics Navigation Systems / M. Kayton, W.R. Fried. – [2 Ed.]. – John Wiley & Sons, 1997. – 769 pp.
4. Матвеев Л.Т. Основы авиационной метеорологии / Л.Т. Матвеев, П.И. Смирнов. – М. : Воениздат, 1955. – 332 с.
5. OpenGL. Программирование трехмерной графики. – Спб. : БХВ-Петербург, 2002. – 304 с.
6. Современные проблемы оптики атмосферы / под общ. ред. акад. В.Е. Зуева. – Л. : Гидрометеоиздат, 1991. – Т. 2.
7. Медвед Д.Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь [Электронный ресурс] / Д.Б. Медвед. – Режим доступа : http ://www.mrvc.ru/pdf/weather.pdf – 14.05.2010.
8. The Shuttle Radar Topography Mission [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/ – 14.05.2010 г.

В.В. Ганченко, О.А. Дудкін, А.В. Інютін, Л.П. Поденок

Моделювання оптико-електронної системи безпілотних літальних апаратів

У статті розглядається проблема моделювання роботи оптико-електронної системи БПЛА щодо задачі відлагодження алгоритмів пошуку та ідентифікації навігаційних орієнтирів. Пропонується використати віртуальний полігон, що формується на основі даних, що взяті з відкритих джерел (Cool Eanth, SRTM), для моделювання відеопотоку даних, що отримуються з камери БПЛА. Використання при розробці бібліотеки OpenGL значно спростило розв’язання задач візуалізації сцен, а також процес моделювання погодних умов та умов освітлення.

V.V. Ganchenko, A.A. Doudkin, A.V. Inytin, L.P. Podenok

Modeling of Optic-Electronic System of UAS

The paper is devoted to the problem of simulation of optic-electronic system for the task of debugging of navigating reference points search and identification algorithms. It is proposed to use the virtual ground formed on the basis of open sources data (Google Earth, SRTM) for modeling video dataflow, received from UAS camera. OpenGL libraries simplify scenes visualization and weather modeling.

Статья поступила в редакцию 01.07.2010